

УДК 372.853

Р.В. Даминов,

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

Аннотация. Описан опыт по электростатике, демонстрирующий колебания проводящего шарика между заряженными конденсаторными пластинами. Приведена методика расчёта параметров колебательной системы.

Ключевые слова: обучение, электростатика, демонстрационный эксперимент.

В этом привлекательном, динамичном опыте демонстрируют механические колебания проводящего шарика, подвешенного между пластинами плоского воздушного конденсатора. Шарик целлулоидный для игры в настольный теннис. Вдоль диаметра шарика просверлены два маленьких отверстия, через которые пропущена капроновая нить. На одном конце нити имеется удерживающий шарик узелок, а на другом – петелька. Поверхность шарика густо обмазана графитом, что делает ее электропроводящей. Для обмазки можно использовать мягкий простой карандаш. Поскольку графит со временем стирается, то обмазку рекомендуется перед демонстрацией обновить.

В верхней части лабораторного штатива установлен горизонтально штырь, на конец которого подвешивают за петельку проводящий шарик, а в нижней части штатива крепят за рукоятку одну из пластин демонстрационного конденсатора. Вторую конденсаторную пластину устанавливают в другом штативе на расстоянии 15-20 см от первой. Эти пластины соединяют с выводами электрофорной машины. Подвешенный шарик должен располагаться в середине промежутка между пластинами (рис. 1).

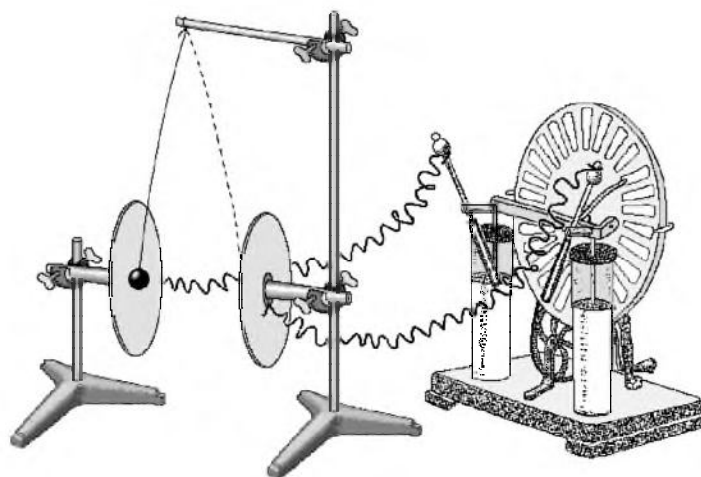


Рис. 1. Электростатический маятник

От электрофорной машины на пластины подают разноименные электрические заряды. Несмотря на то, что при этом шарик пребывает в электрическом поле большой напряженности (порядка 10^6 В/м), он остается неподвижным ввиду отсутствия на нем заряда.

Нить с шариком подводя рукой к одной из пластин с тем, чтобы шарик коснулся этой пластины, и отпускают. После этого шарик стремительно отскакивает от этой пластины и устремляется ко второй пластине. Ударившись об нее, шарик возвращается к первой пластине, затем – ко второй и далее мечется между ними. Удары шарика о пластины сопровождаются громким звуком, причем частоту ударов можно регулировать изменением скорости вращения рукоятки электрофорной машины. Если же электрофорную машину остановить, то колебания со временем ослабевают – частота колебаний уменьшается, а сопровождающие удары звуки становятся тише. С возобновлением работы машины частота ударов возрастает, а удары становятся по-прежнему громкими.

При оценке частоты колебаний шарика можно полагать, что удерживающая его нить достаточно длинна, соударения шарика о пластины неупругие, электрическое поле в конденсаторе однородное, сопротивление воздуха пренебрежимо мало, а его диэлектрическая проницаемость равна 1.

Измеренные параметры деталей опытной установки имеют следующие значения. Расстояние между конденсаторными пластинами $d = 15$ см, диаметр шарика $D = 37$ мм, масса шарика $m = 2,4$ г.

Напряжение на конденсаторных пластинах можно определить по максимальному расстоянию между ними, при котором происходит искровой пробой, которое приблизительно равно 3-4 см. С учетом того, что при

нормальном давлении и влажности воздуха напряженность поля, при котором возникает его пробой, составляет приблизительно 30 кВ/см, определяется напряжение на конденсаторных пластинах: $U \approx 10^5$ В.

Воспользовавшись формулой для расчета емкости C шара, определим заряд q , которым заряжается шарик при его контакте с одной из конденсаторных пластин:

$$q = C \cdot U = 2\pi\epsilon_0 D U \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \quad (1)$$

В последующих расчетах воспользуемся приведенной на рис. 2 схемой взаимодействия шарика с полем конденсатора.

На шарик с зарядом q электрическое поле напряженностью E действует с силой:

$$F = E \cdot q = \frac{U}{d} q \approx 13,3 \cdot 10^{-2} \text{ Н}.$$

Ускорение, с которым движется шарик массой m , равно:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{Uq}{md} = 55,6 \text{ м/с}^2.$$

Расстояние между пластинами шарик, двигаясь прямолинейно и равноускоренно, преодолевает за время:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{a}} = d \sqrt{\frac{2m}{Uq}}.$$

Тогда период колебаний равен: $T = 2t = 2d \sqrt{\frac{2m}{Uq}} = 0,147 \text{ с},$

а частота ν колебаний шарика, с учетом формулы 1, равна:

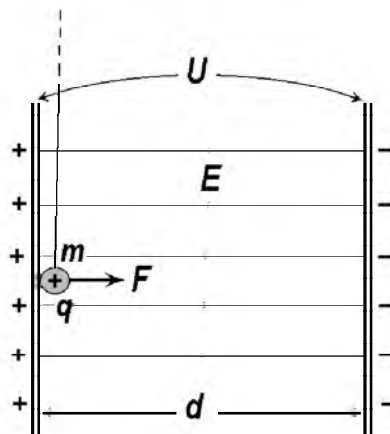


Рис. 2. Схема взаимодействия шарика с конденсатором

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{U}{2d} \sqrt{\frac{\pi \epsilon_0 D}{m}} \approx \frac{10^5 \text{ В}}{2 \cdot 0,15 \text{ м}} \sqrt{\frac{3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 0,037 \text{ м}}{2,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}} \approx 6,8 \text{ Гц.}$$

Это значение частоты колебаний шарика получено при двух существенных допущениях. Во-первых, полагалось, что воздух не оказывает сопротивления движущемуся шарiku и, во-вторых, считалось, что соударения шарика о конденсаторные пластины неупругие. Насколько же существенно влияние этих факторов на полученный результат?

Для учета силы сопротивления воздуха, обусловленного его вязкостью, воспользуемся известным выражением Стокса:

$$F_c = 3\pi\eta Dv,$$

где η – вязкость воздуха, равная 18 мкПа·с (при температуре 25° С), а v – средняя скорость шарика, равная приблизительно 2,3 м/с,

Вычисленное значение этой силы равно $F_c = 14 \cdot 10^{-6}$ Н, что составляет приблизительно 0,01% от силы, с которой электрическое поле конденсатора действует на заряд шарика. Соответственно, учет этой силы при расчете частоты колебаний шарика изменит ее вычисленное значение не более, чем на эти 0,01%, что в данном опыте оказывается несущественным.

Чтобы учесть упругий характер соударений шарика о конденсаторные пластины, надо провести простой опыт: расположив одну из конденсаторных пластин горизонтально и, отпустив над ней шарик без начальной скорости, проследить за тем, на какую долю начальной высоты он поднимется после отскока от пластины.

Наблюдение показало, что шарик отскакивает до высоты, приблизительно в десять раз меньшей той, с которой он был отпущен. Значит начальная скорость шарика после его отскока приблизительно в десять раз меньше его скорости перед соударением. С учетом этого, вычисленное время движения шарика между последующими соударениями приблизительно составляет 0,072 с, а частота колебаний, соответственно, равна 6,94 Гц. Следовательно, учет упругости соударений шарика о конденсаторные пластины увеличивает расчетную частоту его колебаний на 2%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Даминов Р.В. Опыты с электричеством и магнетизмом. – Казань: Изд-во КФУ, 2016. – 184 с.